



Universidade de Aveiro

Ano 2016

Departamento de Ambiente e

Ordenamento

Cidália Marisa dos

Santos Sampaio

Dessalinização da água através de painéis solares

fotovoltaicos



Universidade de Aveiro

Ano 2016

Departamento de Ambiente e

Ordenamento

Cidália Marisa dos
Santos Sampaio

Dessalinização da água através de painéis solares
fotovoltaicos

Projeto apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor António Samagaio, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais...

o júri

presidente

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho

professor auxiliar no Departamento de Ambiente e Ordenamento de Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

professor auxiliar no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Samagaio (Orientador)

professor associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento de Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor António Samagaio, pela orientação e por, apesar de todas as dificuldades, ter aceiteado este projeto.

Ao Engenheiro José Amador sem o qual, este trabalho teria sido muito difícil de realizar.

Aos meus pais, a quem devo tudo. Sem eles nada seria possível.

Aos meus irmãos, por todo o apoio e companhia.

Ao meu noivo, Daniel que ao longo de todos estes anos esteve sempre presente. Sem o seu amor, carinho e incentivo este caminho teria sido quase irrealizável.

À Devesa, mesmo longe sei que posso contar com ela. Sempre Alerta Para Servir!

A todos os meus amigos, que com o seu afeto ajudaram a construir a minha vida.

palavras-chave

Dessalinização da água, Martifer solar, energia solar fotovoltaica, sistema de *ranking*

resumo

A escassez de água é, cada vez mais, um problema atual que afeta vários setores da sociedade, ameaçando também a sustentabilidade industrial e ambiental. Existe a necessidade de encontrar uma solução para este problema que tem um forte impacto à escala global. Uma das alternativas é a dessalinização para a produção de água potável e de irrigação. Este processo foi muito utilizado inicialmente para abastecer os municípios e indústrias de regiões áridas e semiáridas. Os impactos ambientais e económicos são os principais aspetos que condicionam a proliferação deste processo de tratamento de água, visto que muitas das centrais atualmente instaladas são dependentes de fontes energéticas provenientes de combustíveis fósseis. Este projeto tem como âmbito o estudo da possibilidade do uso de energia solar fotovoltaica em sistemas dessalinização.

No âmbito deste caso de estudo, sugerido pela empresa Martifer Solar, apontam-se alguns países onde a aplicabilidade desta tecnologia é emergente.

Dos 24 países estudados, através do método de sistema de ranking, apontam-se Marrocos, Argélia, Egito, Líbia, México e Senegal como países com elevada aplicabilidade de instalação de uma central de dessalinização solar. Já países como a Eslováquia, Guiné-Bissau e Nova Zelândia não é favorável a implementação desta tecnologia.

keywords

Water desalination, Martifer Solar, photovoltaic energy.
ranking methodology

abstract

Water scarcity is a problem that affects all societal sectors, threatening the industrial and environmental sustainability. It is necessary to determine a solution for this problem which has a global impact. An alternative for this problem is the use of desalinization processes for the production of both, fresh water and watering waters. This process was widely used by counties and industries in dry and partially dry locations. Unfortunately the environmental and economic impact of these plants slowed down its proliferation, since their energetic source is fossil fuels.

The aim of this project is to use solar energy in desalinization processes. Based on this case study that Martifer Solar proposed, we point out some countries where this technology is applicable.

Based on the ranking methodology applied, we point out Morocco, Algeria, Egypt, Libya, Mexico and Senegal as countries with potential for the implantation of a solar desalinization plant. However, we don't recommend this technology for countries such as Slovakia, Guinea-Bissau and New Zealand, which were poorly ranked.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XII
ABREVIATURAS.....	XIII
NOMECLATURA.....	XIII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE	3
2.1. DESSALINIZAÇÃO	3
2.1.1. ETAPAS DAS CENTRAIS DE DESSALINIZAÇÃO	4
2.1.1.1. Captação de água	4
2.1.1.2. Pré-tratamento	5
2.1.1.3. Processos de dessalinização	5
2.1.1.3.1. Processos térmicos	6
2.1.1.3.1.1. Destilação <i>multi-flash</i> (MSF)	7
2.1.1.3.1.2. Destilação multi-efeito (MED).....	8
2.1.1.3.1.3. Destilação por compressão a vapor (VC)	9
2.1.1.3.1.4. Destilação solar.....	10
2.1.1.3.2. Processos por membranas	10
2.1.1.3.2.1. Eletrodialise (ED).....	10
2.1.1.3.2.2. Osmose Inversa (RO).....	11
2.1.1.4. Pós-tratamento	13
2.1.1.5. Gestão do subproduto	13
2.1.2. CUSTOS ASSOCIADOS À DESSALINIZAÇÃO.....	14
2.1.3. PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS	16
2.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	18
2.2.1. SISTEMAS <i>OFF-GRID</i>	19
2.2.2. SISTEMAS LIGADOS À REDE	20
2.2.3. SISTEMAS HÍBRIDOS	20
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	23
CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO	31
4.1. Resultados	32
4.2. Discussão	33
4.2.1. PAÍSES ONDE A DESSALINIZAÇÃO SOLAR NÃO APLICÁVEL	33
4.2.2. PAÍSES ONDE A DESSALINIZAÇÃO SOLAR É LIMITADA	34
4.2.3. PAÍSES ONDE A DESSALINIZAÇÃO SOLAR É MODERADA	35
4.2.4. PAÍSES ONDE A DESSALINIZAÇÃO SOLAR É FORTEMENTE APLICADA	36
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	38
BIBLIOGRAFIA	41

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DISTRIBUIÇÃO MUNDIAL DE ÁGUA [1].....	1
FIGURA 2. UNIDADE DE DESSALINIZAÇÃO COM O PROCESSO DE OSMOSE INVERSA [10].	4
FIGURA 3. PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO [11].	6
FIGURA 4. ESQUEMA DO PROCESSO DE MSF [12].	7
FIGURA 5. ESQUEMA DO PROCESSO DE MED [12].....	8
FIGURA 6. DIAGRAMA DO PROCESSO VC, A) MVC E B) TVC [12].	9
FIGURA 7. ESQUEMA DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO SOLAR [14].	10
FIGURA 8. PROCESSO DE ELETRODIÁLISE [17].....	11
FIGURA 9. PARTÍCULAS FILTRADAS EM CADA PROCESSO DE MEMBRANAS.	12
FIGURA 10. ESQUEMA DO PROCESSO DE OSMOSE INVERSA [18].	12
FIGURA 11. CUSTOS DE DESSALINIZAÇÃO DA RO E DOS PROCESSOS TÉRMICOS (MSF E MED) [11].	14
FIGURA 12. PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS [11].	16
FIGURA 13. PROCESSO DE RO COM A IMPLEMENTAÇÃO DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO [11]	18
FIGURA 14. SISTEMA OFF-GRID	19
FIGURA 15. SISTEMA LIGADO À REDE	20
FIGURA 16. SISTEMA HÍBRIDO.....	21
FIGURA 17. RECURSOS HÍDRICOS NACIONAIS <i>PER CAPITA</i> [3].....	27
FIGURA 18. <i>STRESS</i> HÍDRICO. [3]	28
FIGURA 19. RADIAÇÃO SOLAR ANUAL [3]	29
FIGURA 20. RECURSOS DE ÁGUA SALINA [3].....	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. LIMITES DE SALINIDADE DA ÁGUA [6].	3
TABELA 2. CUSTO DOS PROCESSOS TÉRMICOS DE DESSALINIZAÇÃO. ADAPTADO DE [11]	15
TABELA 3. CUSTO GERAIS DAS CENTRAIS DE DESSALINIZAÇÃO POR RO. ADAPTADO DE [11].....	15
TABELA 4. ENERGIA SOLAR E OS PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO. ADAPTADO DE [12]	17
TABELA 5. ESCASSEZ DE ÁGUA E <i>STRESS</i> HÍDRICO. ADAPTADO DE [3]	24
TABELA 6. PARÂMETROS DO SISTEMA DE RANKING. ADAPTADO DE [3].....	25
TABELA 7. DADOS DOS VÁRIOS PAÍSES EM ESTUDO	31
TABELA 8. RESULTADOS OBTIDOS	33
TABELA 9. DESSALINIZAÇÃO NÃO APLICÁVEL ($R < 0,125$)	34
TABELA 10. DESSALINIZAÇÃO SOLAR LIMITADA ($0,125 < R < 0,273$)	34
TABELA 11. DESSALINIZAÇÃO SOLAR MODERADA ($0,273 < R < 0,422$)	35
TABELA 12. DESSALINIZAÇÃO SOLAR FORTEMENTE APLICÁVEL ($R > 0,422$)	36

ABREVIATURAS

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Continua

ED – Electrodialysis (Eletrodiálise)

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura)

IDA – International Desalination Association (Associação Internacional de Dessalinização)

MED – Multiple Effect Distillation (Destilação Multi-Efeito)

MSF – Multi-Stage Flash distillation (Destilação Multi-Flash)

MVC – Mechanical Vapour Compression (Destilação por Compressão Mecânica de Vapor)

RO – Reverse Osmosis (Osmose Inversa)

TDS – Total Dissolved Solids (Sólidos Dissolvidos Totais)

TVC – Thermal Vapour Compression (Destilação por Compressão Térmica de Vapor)

VC – Vapour Compression (Destilação por Compressão de Vapor)

WHO – World Health Organization (Organização Mundial de Saúde)

NOMECLATURA

R – Ranking global [-]

r_N – Escassez nacional de água [$\text{m}^3 \text{capita}^{-1} \text{ano}^{-1}$]

r_F – *Stress* hídrico

r_s - Fontes de águas salinas

r_H - Incidência solar anual [$\text{kWh m}^{-2} \text{ano}^{-1}$]

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A necessidade de preservação da água e o seu uso sustentável constituem elementos essenciais para garantia da qualidade de vida do Homem e são a base fundamental para o desenvolvimento social e económico de todos os povos e nações. No entanto, o crescimento da população, a poluição e o uso ineficiente da água tem limitado o seu acesso quer em quantidade, quer em qualidade.

A procura de água potável está a crescer de forma constante e a sua distribuição de forma equilibrada está a tornar-se um dos maiores desafios à população mundial. Segundo a Organização Mundial de Saúde (WHO) 20% da população mundial tem acesso inadequado a água potável.

A água encontra-se em praticamente toda a parte. O nosso planeta é constituído por 97,5% de água salgada e 2,5% de água doce contida nos polos, águas subterrâneas, lagos e rios, como mostra a Figura 1. Desta quantidade de água doce, 70% encontra-se em estado sólido, sob a forma de glaciares, icebergues e outros. Os restantes 30% correspondem à água subterrânea e aquíferos de difícil acesso. Portanto, grande parte da água existente não se encontra disponível para utilização.

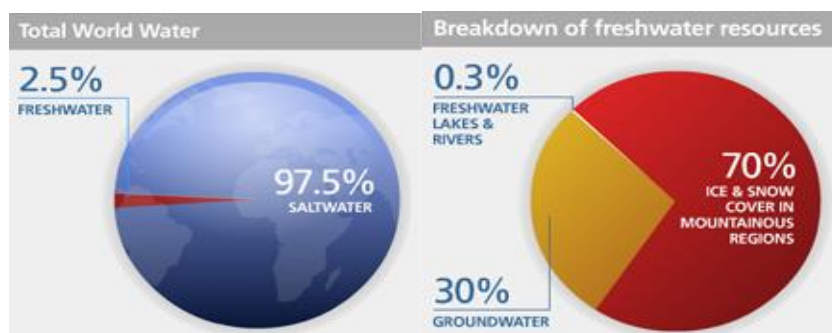


Figura 1. Distribuição mundial de água [1].

De acordo com o *World Water Development Report* (relatório efetuado por 23 agências das Nações Unidas), o planeta encontra-se neste século, a viver uma “séria crise de água”, que

tende a agravar-se. Uma vez que a água é o património e a mercadoria mais preciosa do século XXI e sem ela não há vida, é urgente adotar medidas rápidas e eficazes no combate a esta crise.

Cada vez mais a escassez de água tem vindo a afetar os países em desenvolvimento onde reside metade da população mundial. Nestes países, 30% das mortes verificadas resultam do consumo de água de pouca qualidade. Nos próximos 25 anos, espera-se um aumento cerca quatro vezes superior de pessoas afetadas pela escassez de água [1].

Parte desse aumento está relacionado com o crescimento da população e com as exigências de industrialização. Atualmente o consumo de água duplica a cada 20 anos, o dobro da taxa de crescimento da população. Existe necessidade de encontrar novas tecnologias fiáveis e sustentáveis que permitem corresponder à procura crescente deste recurso [1].

A água é potável quando contém menos de 500 ppm de sais dissolvidos. Existem métodos para a transformação de água salgada em água potável. A este processo chama-se dessalinização, ou seja, a remoção de sais minerais da água salgada, permitindo a produção de água potável. A dessalinização tem-se demonstrado cada vez mais como uma alternativa viável para o fornecimento de água potável [2].

A dessalinização é uma das alternativas para a produção de água potável para consumo humano e irrigação. Já existem países a utilizar esta forma de obtenção de água, principalmente no Médio Oriente (Turquia, Kuwait, Arábia Saudita) [2], [3].

Segundo a bibliografia consultada, a dessalinização representará uma das principais fontes de recursos hídricos, principalmente para países com carências naturais em água potável. É uma tecnologia para responder de uma forma ampla, não só ao fornecimento de água potável para fins domésticos e municipais, como também para processos industriais, ou como recurso de emergência para refugiados ou operações militares [4].

CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE

2.1. DESSALINIZAÇÃO

Transformar a água salgada em água doce sempre foi uma meta estabelecida pelo ser humano. Na antiguidade, há 2 300 anos, Aristóteles antevendo alguma preocupação com este recurso natural, explicava aos seus alunos que: “a água salgada, quando passa a vapor torna-se doce e o vapor não produz água salgada depois de se condensar” [5].

A dessalinização é um processo físico-químico usado para obter água doce através da remoção dos sais nela dissolvidos. Existem vários graus de salinidade, que consequentemente afetam os custos de tratamento.

Na Tabela 1 pode-se verificar os vários graus de salinidade da água. A água do mar possui uma salinidade que varia entre os 30 – 50 ppm (‰) enquanto a salinidade da água doce é inferior a 0,5 ppm (‰). Quanto mais concentrada for a solução salina, maior será a energia e o esforço necessário para a dessalinizar [6].

Tabela 1. Limites de salinidade da água [6].

Salinidade da água na quantidade de sais dissolvidos em partes por mil (‰)			
Água doce	Água salobra	Água salgada	Salmoura
< 0,5	0,5 – 30	30 – 50	> 50

Segundo a IDA (*International Desalination Association*) existem 18 426 centrais de dessalinização (dados até junho de 2015) em 150 países no mundo. A maioria destas centrais encontram-se localizadas nos países do Médio Oriente, Região do Golfo, nos Estados Unidos da América e Espanha [7][8].

2.1.1. ETAPAS DAS CENTRAIS DE DESSALINIZAÇÃO

Independentemente do tipo de processo utilizado na dessalinização, as etapas que constituem uma central de dessalinização são comuns, Figura 2 [4] [9]:

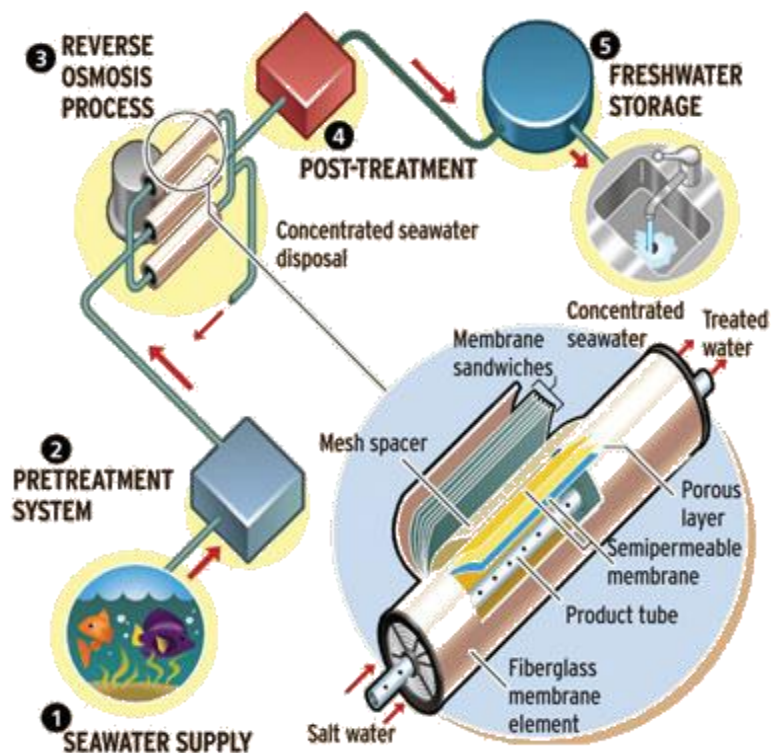


Figura 2. Unidade de dessalinização com o processo de osmose inversa [10].

2.1.1.1. Captação de água

Captar a água constitui a primeira etapa na dessalinização. São necessárias estruturas para extrair água da fonte, conduzi-la e introduzi-la no sistema, onde esta será transformada em água potável.

A água que chega à unidade de dessalinização pode ter origem em várias fontes tanto superficiais (oceanos, rios, lagos, etc.), como subterrâneas (aquíferos, poços, galerias de infiltração) determinantes para apurar o seu grau de salinidade.

Normalmente, as águas superficiais contêm um maior número de contaminantes presentes, bem como, maior quantidade de matéria orgânica. Muitas águas superficiais são sujeitas a descargas, que poderão ser controladas ou não, provenientes de campos agrícolas, de fontes domésticas ou mesmo de descargas naturais provenientes de escorrências do solo. Estas

descargas poderão afetar a qualidade da água e consequentemente adaptar a linha de tratamento para que se atinja um nível adequado de qualidade de água [9].

As centrais de dessalinização requerem sistemas de captação de água capazes de fornecer água em quantidade suficiente, com a melhor qualidade possível e com o mínimo de perturbação causada nos ecossistemas adjacentes.

2.1.1.2. Pré-tratamento

Após a captação da água dá-se início ao tratamento da água. O pré-tratamento é a primeira etapa deste processo e permite preparar a água para que esta seja introduzida na etapa seguinte cumprindo a critérios específicos. De acordo com o NRC (2008), o pré-tratamento garante que os compostos presentes na água não conduzam a uma redução do rendimento das centrais, tornando-se numa das etapas mais importantes para garantir a otimização do tratamento [9].

Paras as centrais que recorrem a processos de dessalinização térmicos, os metais pesados são um dos aspetos mais importantes a ter em consideração na fase de pré-tratamento, de forma a evitar a corrosão dos equipamentos. A remoção de areias ou outro tipo de sólidos suspensos, pode também ser necessário de forma a evitar a corrosão das tubagens.

No caso da osmose inversa, a sensibilidade das membranas requer que a fase de pré-tratamento efetue uma remoção eficiente, não só de metais pesados e partículas de maiores dimensões, como de partículas coloidais e em suspensão, assim como da matéria orgânica natural, para prevenir que todos estes colmatem as membranas. De forma a evitar o crescimento biológico, pode ser necessário recorrer a biocidas ou desinfetantes. Para que a dessalinização seja bem-sucedida é fundamental proteger as membranas.

2.1.1.3. Processos de dessalinização

Atualmente os processos de dessalinização utilizados dividem-se em dois grupos: os processos térmicos e as tecnologias de membranas, como se pode verificar na Figura 3 [11].

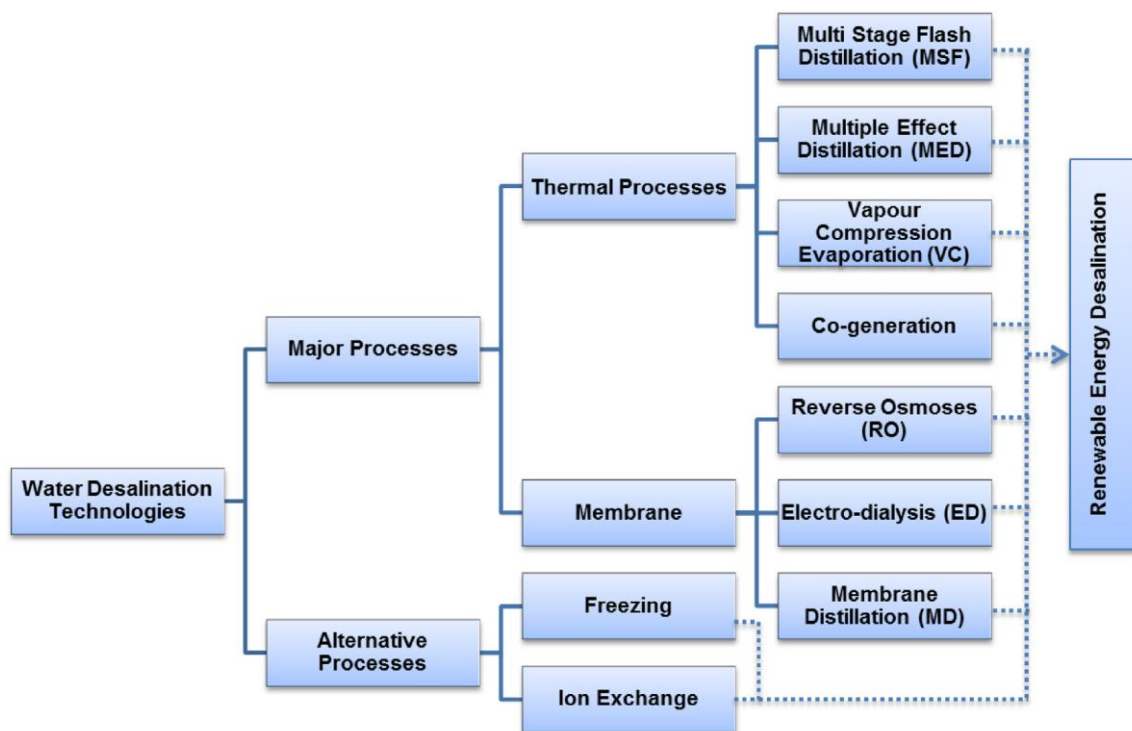


Figura 3. Processos de dessalinização [11].

2.1.1.3.1. Processos térmicos

Os processos térmicos mimetizam o processo natural do ciclo da água, ou seja, a água salgada aquece, evapora, condensa e precipita sob a forma de água potável. A obtenção de água doce a partir de água salgada, por processos térmicos, é conseguida recorrendo ao método de destilação. Geralmente neste método são, utilizadas uma série de caldeiras onde a temperatura vai diminuindo em cada fase do processo [4].

Para evaporar a água é necessário atingir-se uma temperatura superior à temperatura ambiente e, ao mesmo tempo, assegurar uma grande quantidade de energia para manter o processo. Estes métodos são, por isso, frequentemente encontrados em países do Médio Oriente, onde abunda o petróleo, que é utilizado como combustível para produzir a energia elétrica, necessária para alimentar o processo.

Trata-se de um processo cuja construção e manutenção são de baixo custo e simples de operar. No entanto, têm como desvantagens as baixas taxas de rendimento necessidade de grandes áreas para a construção dos tanques e requerem uma grande incidência solar.

Os principais processos de dessalinização térmica são:

- Destilação *multi-flash* (MSF);
- Destilação multi-efeito (MED);
- Destilação por compressão a vapor (VC);
- Destilação solar.

Os dois processos mais utilizados a nível mundial são a MSF e a MED. Ambos os processos são utilizados na dessalinização de água salgada e salobra sendo mais utilizados na dessalinização de água salgada [11].

2.1.1.3.1.1. Destilação *multi-flash* (MSF)

A destilação *multi-flash* consiste no aquecimento da água salina, onde a temperatura e a pressão é controlada. A água é introduzida numa câmara a pressão reduzida, onde ocorre a sua vaporização imediata. Utiliza-se de seguida vapor a alta temperatura para fazer a água entrar em ebulição. Por ser um processo múltiplos estágios a água passa por diversas câmaras de ebulição/condensação, garantindo um elevado grau de pureza.

A água doce é obtida através da aplicação de energia térmica à água salina que alimenta os vários ciclos, Figura 4. Destes ciclos resulta água potável para uso e um concentrado de sais que é devolvido ao mar [4].

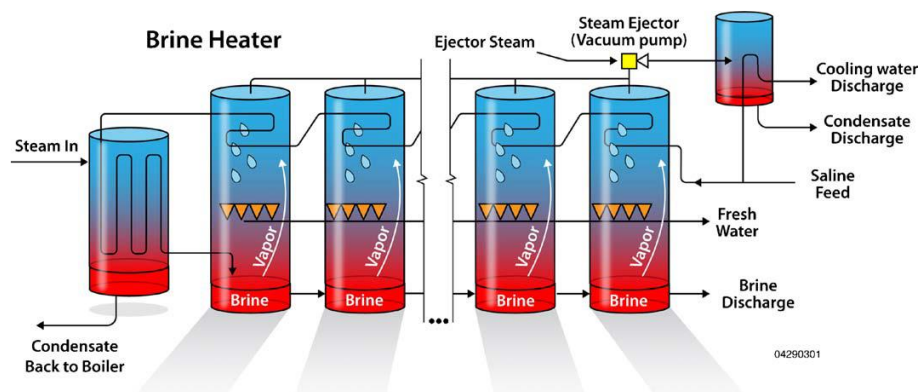


Figura 4. Esquema do processo de MSF [12].

É uma técnica muito dispendiosa uma vez que necessita de grande quantidade de energia para alimentar o processo que é utilizado para capacidades muito grandes, na ordem das centenas de milhares de m³, de água dessalinizada por dia.

É no Norte de África e no Médio Oriente, mais especificamente na Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos, Kuwait, Líbia e Irão, que se concentra o maior número de centrais que recorrem a este tipo de tecnologia.

2.1.1.3.1.2. Destilação multi-efeito (MED)

A destilação multi-efeito consiste numa série de câmaras, normalmente entre 8 a 12, para produzir quantidades cumulativas de água destilada. Cada câmara/estágio é caracterizada por um recipiente de pressão atravessado por um feixe de tubos, onde a água salina evapora como resultado da pressão aplicada. Por sua vez, cada recipiente, tem uma pressão ajustada a níveis mais baixos do que a pressão atmosférica, de forma a permitir a ebulição da água a uma temperatura inferior àquela que seria necessária à pressão atmosférica [2].

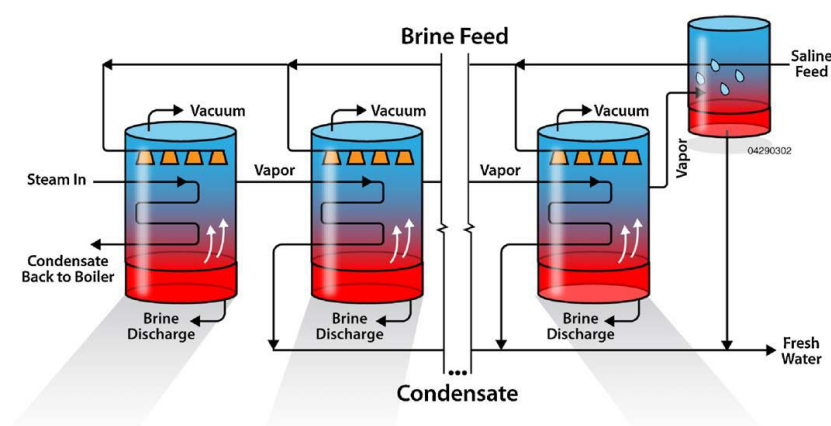


Figura 5. Esquema do processo de MED [12].

A MED, tal como a MSF, adapta-se a qualquer fonte de calor e tem uma capacidade para dessalinizar grandes quantidades de água salgada. A temperatura máxima de operação deste tipo de destilador é da ordem dos 64 – 70°C e a capacidade média varia entre 2 000 a 20 000 m³/dia e requer uma área de aproximadamente 11,5 ha [2], [13].

Os custos dos trabalhos de engenharia civil são baixos, fruto da pequena área de implantação, assim como os custos de manutenção. Estas centrais operam 24 horas por dia, exigindo pouca supervisão e com grande eficiência térmica, o que permite poupar nos custos de combustíveis [13].

2.1.1.3.1.3. Destilação por compressão a vapor (VC)

O processo de funcionamento é semelhante ao processo MED, com a diferença de que VC recorre a um compressor para o vapor de água gerado na evaporação da água a altas pressões. [4]

Este processo têm duas formas de diferentes de operar. Numa a compressão do vapor pode ser feita por meio de um compressor mecânico (MVC), enquanto noutra, são adicionadas pequenas quantidades de vapor a alta pressão por meio de um ejetor (TVC), Figura 6 [12].

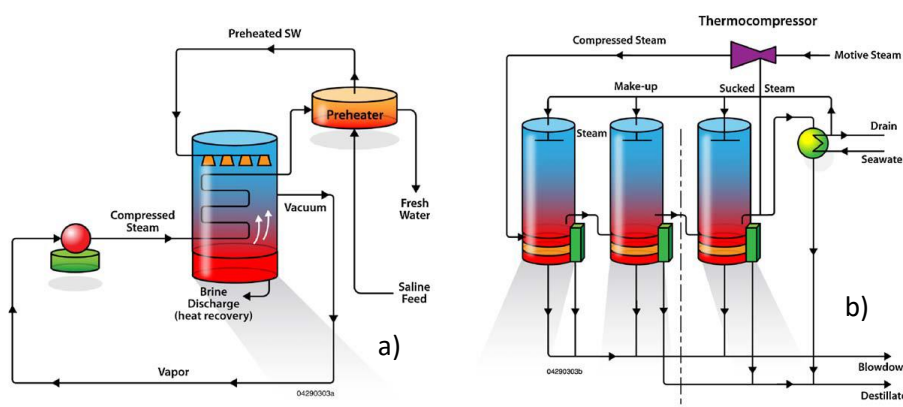


Figura 6. Diagrama do processo VC, a) MVC e b) TVC [12].

A técnica MVC funciona apenas num etapa enquanto a TVC necessita de várias etapas no decurso do processo. A temperatura máxima de operação é de 64 - 74°C. A capacidade de funcionar com temperaturas baixas possibilita a utilização de materiais metálicos, como o alumínio, pois o ataque corrosivo é reduzido.

Este processo é considerado, por alguns autores, o mais eficiente dado que, atualmente já é possível encontrar no mercado compressores modernos com uma eficiência que pode chegar aos 80%.

O uso da energia elétrica como fonte principal de energia faz com que este processo seja usado muitas vezes como processo paralelo a outras técnicas de dessalinização. Este funcionamento híbrido permite uma otimização do consumo energético do sistema. Este método de dessalinização é aplicada na produção de água potável em estações de pequena e média escala, como hotéis, barcos e pequenas comunidades [4].

2.1.1.3.1.4. Destilação solar

A dessalinização por destilação solar de recorre à energia solar de forma a promover a evaporação da água e a subsequente condensação. É a forma mais simples de dessalinização.

A água é depositada dentro de um taque revestido com placas transparentes em forma de cone que permite a entrada da radiação solar. A água que é aquecida (pela radiação solar) evapora e condensa e é recolhido numa caixa ou compartimento para o efeito, quando entra em contacto com o cone transparente que, devido ao contacto com o ambiente, se encontra a uma temperatura mais baixa, Figura 7 [4].

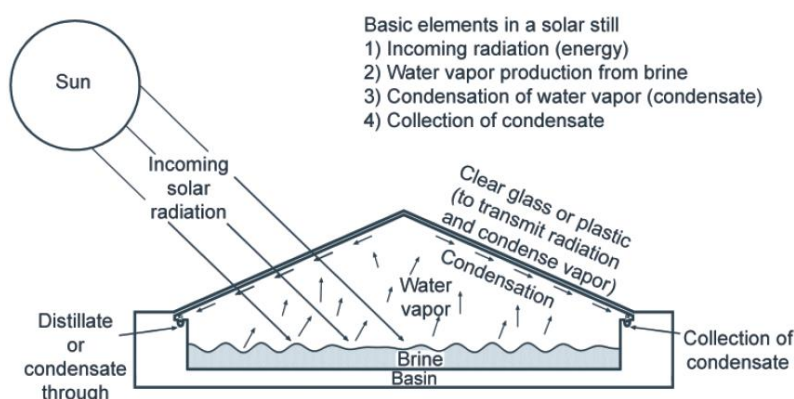


Figura 7. Esquema do processo de destilação Solar [14].

2.1.1.3.2. Processos por membranas

Os processos que utilizam membranas na separação dos sais podem ser efetuados por eletrodialise (ED) e osmose inversa (RO).

Atualmente, estes processos são utilizados na produção de água para consumo humano, sendo a osmose inversa (RO) o mais aconselhado [4], [15].

2.1.1.3.2.1. Eletrodialise (ED)

A eletrodialise consiste na aplicação de uma força eletromotriz nos elétrodos que se encontram de ambos os lados de uma membrana com o objetivo de separar os sais que se encontram dissolvidos na água.

Neste método, os sais atravessam uma membrana permeável, sob o efeito de uma corrente elétrica. São colocadas, uma serie de membranas aniónicas e catiónicas alternadamente, entre dois elétrodos, por onde circula a água a ser tratada. Com a aplicação de um potencial elétrico entre os elétrodos, os catiões migram no sentido do cátodo enquanto os

ânions deslocam-se no sentido do ânodo obtendo-se assim separadamente uma corrente de água desmineralizada e outra enriquecida em íons [16].

Por vezes, é necessário proceder-se a um pré-tratamento antes de se realizar a eletrodiálise. Este processo requer um custo inicial elevado para a instalação da central e os custos energéticos para manter o processo, também são elevados.

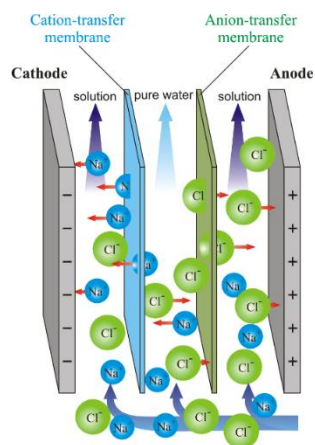


Figura 8. Processo de eletrodiálise [17].

A ED é responsável por aproximadamente 5% do volume mundial de água dessalinizada no mundo [7].

2.1.1.3.2.2. Osmose Inversa (RO)

A osmose inversa é uma das técnicas de dessalinização com maior crescimento nas últimas décadas e com maior número de instalações.

Os processos de membranas por gradiente de pressão encontram-se esquematicamente apresentados na Figura 9, evidenciando o tipo de partículas filtradas.

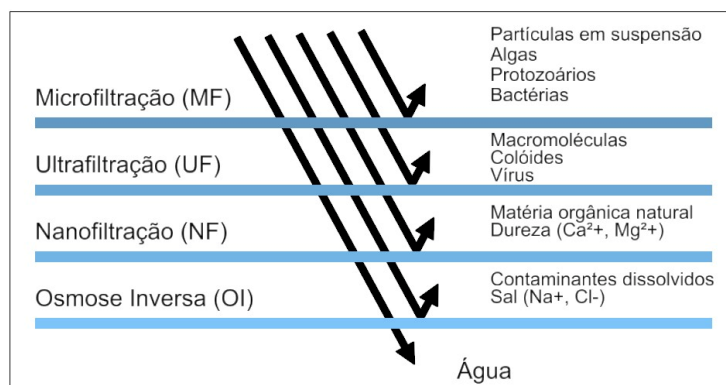


Figura 9. Partículas filtradas em cada processo de membranas.

Como se pode verificar pela Figura 9, apenas o processo de osmose inversa (RO) é indicado para o processo de dessalinização, pois é o único, neste tipo de processos, que retém sais e outros constituintes da água permitindo a formação de água doce. Os outros processos poderão, contudo, fazer parte de uma central de dessalinização, mas apenas como parte integrante dos processos de pré-tratamento da água a dessalinizar [12].

O processo de RO consiste na separação de sais presentes na água através de um efeito de pressão superior à pressão osmótica, sobre uma membrana semipermeável. A água desloca-se do meio mais concentrado (hipertónico) para o meio menos concentrado (hipotónico). Este fluxo termina quando as duas soluções separadas pela membrana atingem o equilíbrio, ficando com a mesma concentração, Figura 10.

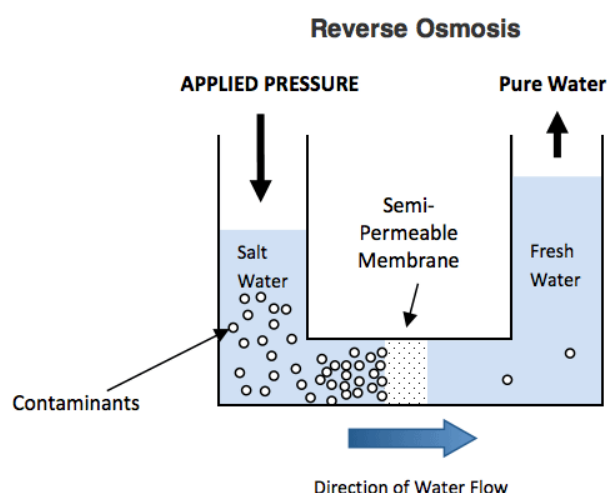


Figura 10. Esquema do processo de osmose inversa [18].

A membrana de RO apresenta poros pequenos permitindo apenas passagem de moléculas de água, impedindo que passem sais, daí a sua grande utilização em sistemas de purificação de água. Na RO, aplica-se uma pressão superior à pressão osmótica na solução mais

concentrada, para inverter o fluxo natural da água, passando a água a deslocar-se da solução mais concentrada para a mais diluída. Obtêm-se assim duas soluções, uma solução de água dessalinizada e outra concentrada em sais (solução rejeitada) [2].

Nos últimos 30 anos desenvolveram-se esforços com vista a redução de custos, especialmente no desempenho das membranas e no consumo de energia, ao mesmo tempo que foram criados sistemas de recuperação energéticos mais eficientes.

O desempenho dos materiais da membrana e dos módulos subsequentes, melhorou no que diz respeito ao aumento da capacidade de rejeição de sal. O aumento de superfície por unidade de volume, do fluxo, assim como o prolongamento da vida da membrana e a capacidade de trabalhar com maior pressão, são fatores que contribuem para a diminuição do custo da membrana [19].

Ao contrário da tecnologia térmica de MSF, a tecnologia RO não tem um padrão de localização geográfica específica, estando disperso pelo mundo, nomeadamente nos EUA, Arábia Saudita, Espanha, Japão e Coreia [19].

2.1.1.4. Pós-tratamento

Antes do armazenamento e distribuição da água dessalinizada, esta deve sofrer um processo de pós-tratamento. Esta última etapa de tratamento da água consiste numa estabilização da água, tornando-a compatível com o sistema de distribuição.

O processo de dessalinização reduz o nível de alcalinidade da água, podendo causar a corrosão nos sistemas de distribuição de água, devendo-se, para tal, proceder a um ajustamento final no pH e da alcalinidade.

Nesta fase é ainda fundamental recorrer a uma desinfecção da água de forma a eliminar microorganismos no sentido de assegurar que a água se encontra pronta para consumo humano.

2.1.1.5. Gestão do subproduto

As centrais de dessalinização produzem dois produtos, a água para consumo e o concentrado salino. A caracterização do concentrado é definida pela sua temperatura, densidade e salinidade. Embora o aumento da salinidade, no fluxo de concentrado, seja uma característica comum a todas as tecnologias de dessalinização, o aumento da temperatura é uma característica das unidades que recorrem à tecnologia da destilação, pois esta recorre ao

aumento da temperatura da água provocando a separação dos sais da água. A densidade do concentrado também varia de acordo com a tecnologia a que se recorreu [20].

2.1.2. CUSTOS ASSOCIADOS À DESSALINIZAÇÃO

Os processos de dessalinização requerem grandes quantidades de energia tornando-os dispendiosos tanto a nível económico como ambiental. Muitos estudos de custos de dessalinização estão relacionados com as fontes de energias renováveis. O custo por m³ de água dessalinizada varia de instalação para instalação. Esta variabilidade existe porque o custo de água depende de vários fatores, o processo de dessalinização, o nível de salinidade da água de alimentação, a fonte de energia, a capacidade da central de dessalinização, e outros fatores relacionados com o local de implantação, como se verifica na Figura 11. [11], [15].

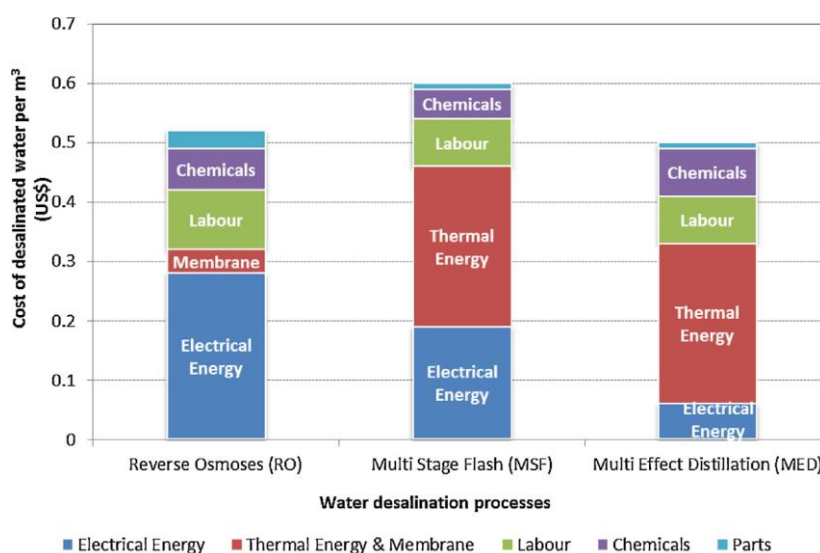


Figura 11. Custos de dessalinização da RO e dos processos térmicos (MSF e MED) [11].

A maioria dos processos térmicos de dessalinização utilizam combustíveis fósseis como fonte de energia, fazendo com que o custo seja elevado e dependa das oscilações do mercado. Como se pode verificar na Figura 11, as centrais de dessalinização por MED, com grande capacidade de produção, acima dos 91 000 m³, tem um custo de dessalinização que varia entre 0,52US\$ e 1,01 US\$ por metro cúbico de água produzida.

Tabela 2. Custo dos processos térmicos de dessalinização. Adaptado de [11]

Processos de dessalinização	Capacidade dos sistemas de dessalinização m ³ /dia	Custo da dessalinização <i>per</i> m ³ (US\$)
MED	< 100	2,5 – 10
	12 000 – 55 000	0,95 – 1,95
	> 91000	0,52 – 1,01
MSF	23 000 – 528 000	0,52 – 1,75
VC	1 000 – 12 000	2,01 – 2,66

O avanço da tecnologia no que diz respeito aos materiais das membranas, das bombas e fontes de energia, permitiu uma poupança energética dos sistemas de dessalinização por processos de osmose inversa, diminuindo assim os seus custos operacionais.

Os custos das centrais de dessalinização por membranas variam de acordo com a origem e composição da água que é fornecida ao sistema. As grandes centrais de RO podem utilizar água salobra com TDS de 2000 ppm até 10000 ppm. No entanto se o TDS aumentar, o custo também aumenta, como se verifica na Tabela 3. O custo da dessalinização da água salobra no Médio Oriente, com uma concentração de TDS de 2300 ppm, é de 0,26 US\$/m³, enquanto na Florida, o custo de dessalinização com a concentração de TDS de 5 000 ppm é de 0,27 US\$/m³. Já o custo da dessalinização da água do mar por RO em Israel é de 0,52 US\$/ m³ para uma central com capacidade de 320 000 m³/dia e o custo para a central com capacidade de 94 600 m³/dia na Florida é de 0,56 US\$/ m³ [11].

Tabela 3. Custo gerais das centrais de dessalinização por RO. Adaptado de [11]

Origem da água	Capacidade das centrais de dessalinização m ³ /dia	Custo da dessalinização <i>per</i> m ³ (US\$)
Água salobra	< 20	5,63 – 12,90
	20 – 12 000	0,78 – 1,33
	40000 - 46000	0,26 – 0,54
Água do mar	< 100	1,50 – 18,75
	250 – 1000	1,25 – 3,93
	15000 – 60000	0,48 – 1,62
	100000 – 320000	0,45 – 0,66

2.1.3. PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS

As recentes investigações na área da dessalinização têm evoluído na perspectiva de aumentar a eficiência energética e diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, através da associação do processo de dessalinização com fontes de energias renováveis.

A dessalinização e as energias renováveis são duas tecnologias diferentes, que podem ser combinadas de diversas formas. Apesar de ambas as tecnologias já estarem bastante desenvolvidas ainda é necessário otimizar o seu desempenho para o aumento da eficiência do processo, da diminuição do volume da instalação e dos custos operacionais e manutenção [7], [21].

As fontes de energias renováveis mais comuns associadas aos processos de dessalinização são: a energia solar (fotovoltaica e térmica), a energia eólica e energia geotérmica, Figura 12 [7].

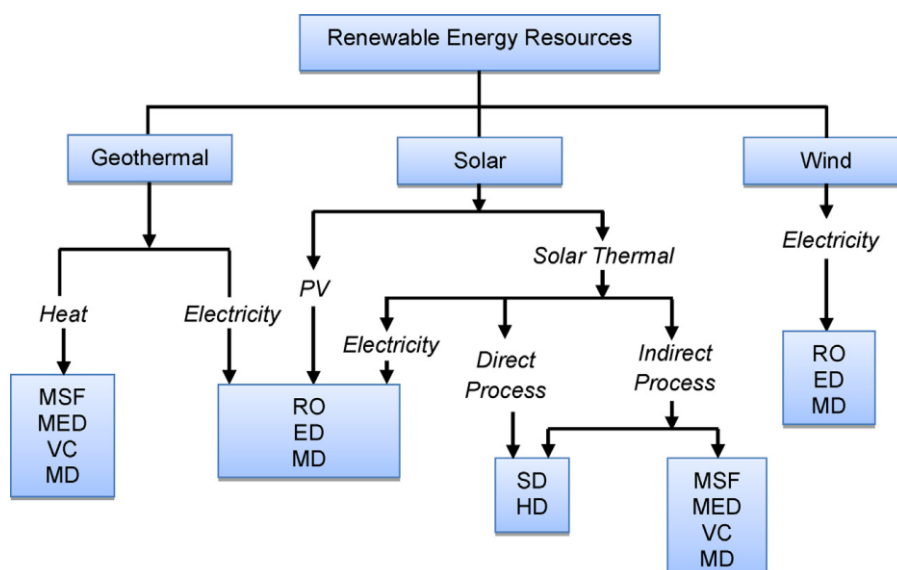


Figura 12. Processos de dessalinização e as energias renováveis [11].

No entanto, nem todas as combinações de sistemas de dessalinização dependentes de energias renováveis são consideradas adequados para aplicações práticas, muitas destas combinações podem não ser viáveis em determinadas circunstâncias. O avanço tecnológico pode ser uma limitação em locais onde os recursos hídricos são limitados. A experiência tem demonstrado que as várias tentativas de integração de soluções avançadas de dessalinização falharam, em áreas isoladas, devido à falta de suporte técnico [7], [11].

Para avaliar a viabilidade da combinação de diferentes tecnologias, deve-se ter em consideração vários fatores, tais como, as condições geográficas, a topografia do local, a

capacidade e o tipo de energia disponível ao mais baixo custo de fornecimento, disponibilidade de infraestruturas locais (incluindo rede elétrica), a dimensão da unidade de produção de água e a salinidade da água a tratar [7].

Dessalinização da água utilizando a energia solar fotovoltaica

A energia fotovoltaica consiste na conversão da radiação solar diretamente na forma de eletricidade. A radiação solar é convertida em corrente contínua, sendo necessário equipamento adicional quer para a conversão da corrente contínua em corrente alternada (alternador) que ainda para a sua acumulação (baterias) caso a energia seja necessária em alturas em que a radiação solar não esteja disponível.

A utilização de sistemas fotovoltaicos autónomos e/ou híbridos de média potência podem contribuir para solucionar a problemática do fornecimento de eletricidade e já são competitivos em locais remotos onde as soluções alternativas convencionais são claramente inferiores do ponto de vista económico e apresentam inconvenientes ambientais não negligenciáveis.

A Tabela 4 apresenta as possíveis combinações entre a energia solar (fotovoltaica e térmica) com os processos de dessalinização.

Tabela 4. Energia solar e os processos de dessalinização. Adaptado de [12]

Energia solar	Processos de dessalinização				
	MSF	MED	VC	RO	ED
Fotovoltaica	--	--	--	√	√
Térmica	√	√	--	--	--

A bibliografia demonstra que, de entre os vários processos de dessalinização, a osmose inversa é o mais indicado para o aproveitamento de água potável e a tabela 4 aponta a energia solar fotovoltaica como a fonte de alimentação mais indicada.

Por estes factos optou-se por estudar a viabilidade do processo de osmose inversa na dessalinização da água em determinados países utilizando a energia solar fotovoltaica, com a preciosa colaboração da empresa Martifer Solar cujo conhecimento tecnológico na área do aproveitamento da energia solar fotovoltaica se encontra bastante desenvolvido.

A Figura 13 apresenta um esquema de um sistema de dessalinização de osmose inversa com painéis fotovoltaicos.

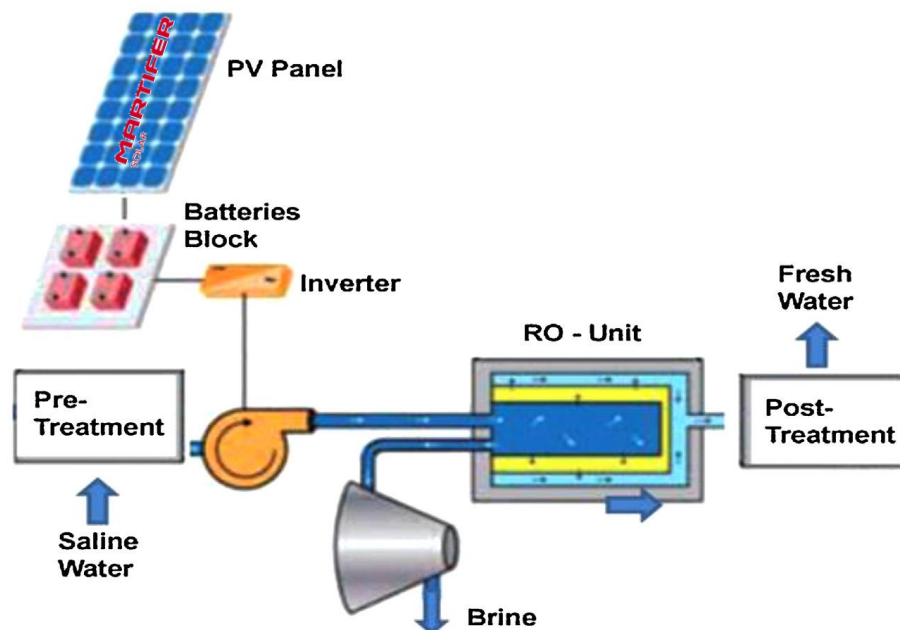


Figura 13. Processo de RO com a implementação de um painel fotovoltaico [11]

2.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos convertem a energia proveniente da radiação solar que atinge a superfície terrestre em energia elétrica. Hoje em dia, os sistemas fotovoltaicos são usados num vasto conjunto de aplicações distintas, de entre as quais se destacam as seguintes aplicações em média potência:

- Eletrificação rural, em que os sistemas fotovoltaicos são utilizados para abastecimento de cargas domésticas em locais sem rede, bombagem de água, irrigação, complemento de abastecimento de locais remotos com ou sem rede.
- Produção descentralizada, em que os sistemas fotovoltaicos são utilizados como fonte de produção dispersa, entregando à rede a totalidade ou parte da energia produzida.

Os sistemas fotovoltaicos, sozinhos ou em associação com outras fontes de energias renováveis são competitivos para a alimentação de certos locais remotos onde as soluções alternativas convencionais apresentam inconvenientes ambientais consideráveis e são desfavoráveis do ponto de vista económico. No caso de sistemas fotovoltaicos ligados à rede, a situação é bastante diferente, pois estes estão ainda longe de serem competitivos mesmo quando comparados com outras fontes renováveis.

Estes sistemas podem ser classificados como sistemas *off-grid* (autónomos), ligados à rede pública e em sistemas híbridos.

2.2.1. SISTEMAS OFF-GRID

Os sistemas fotovoltaicos *off-grid* ou autónomos são utilizados particularmente em zonas onde a rede pública de distribuição de energia elétrica não existe ou é muito fraca, a principal fonte de energia pode ser de origem fóssil ou renovável.

Estes sistemas possuem um enorme potencial para aplicação nos países em vias de desenvolvimento, onde se encontram grandes áreas que permanecem sem fornecimento de energia elétrica ou quando esta é uma opção muito dispendiosa. Permite acesso a energia elétrica e satisfaz as necessidades básicas, tais como: bombeamento e purificação de água; refrigeração de alimentos; iluminação; eletrificação rural, entre outros.



Figura 14. Sistema off-grid

Estes sistemas são constituídos, geralmente, por módulos fotovoltaicos, reguladores de cargas, inversores, baterias e, quando necessário, equipamento de *backup*, para entrar em funcionamento em situações críticas da falta de energia solar, garantido o fornecimento de energia à instalação.

Num sistema *off-grid* não se pode consumir mais energia de forma contínua do que os painéis produzem. A bateria é utilizada para um armazenamento temporário e para garantir uma reserva de energia. Quanto mais potência é extraída, menor será o período de vida.

Uma das tarefas mais importantes quando se planeiam sistemas autónomos consiste em equilibrar a relação entre o consumo e a produção de energia. Uma vez que a energia solar é uma fonte de energia limitada e aleatória, o consumo diário de energia elétrica, o nível de radiação e a capacidade do acumulador, devem ser calculados com rigor e equilibrados entre si.

2.2.2. SISTEMAS LIGADOS À REDE

Nos sistemas ligados à rede elétrica não é necessário a utilização de baterias, sendo a própria rede elétrica utilizada para esse fim. Toda a energia que a radiação solar produz é entregue à rede. Para tal é necessário um inversor que faz a interface entre o painel e a rede, de modo a converter a energia produzida em corrente contínua (CC) pelo painel para corrente alternada (CA) exigida pela rede. Um sistema fotovoltaico com ligação à rede é composto pelos seguintes componentes, Figura 15:

- Módulos fotovoltaicos – vários módulos fotovoltaicos dispostos em serie e em paralelo, com estruturas de suporte e de montagem;
- Caixa de junção – equipada com dispositivos de proteção e interruptor de corte principal CC;
- Cabos CA-CC;
- Inversor;
- Mecanismos de proteção e aparelho de medida.

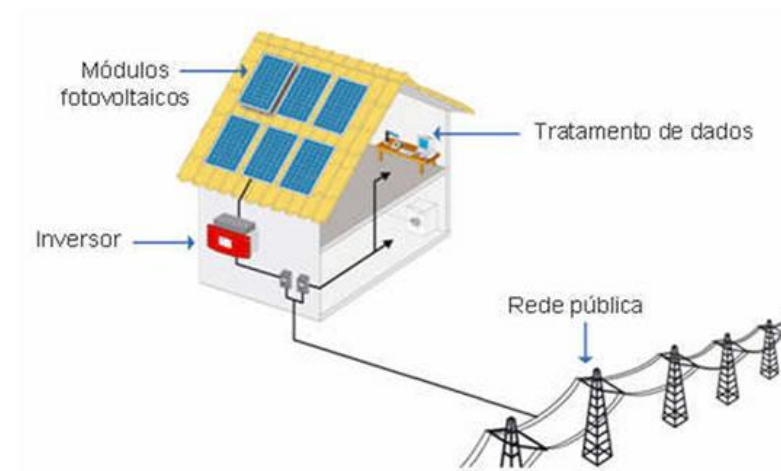


Figura 15. Sistema ligado à rede

2.2.3. SISTEMAS HÍBRIDOS

Um sistema híbrido consiste na junção de duas fontes de produção de energia elétrica diferentes num único sistema. A energia primária pode ser a energia solar ou eólica que, com recurso a painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas, sendo convertida em energia elétrica e armazenada em baterias para consumo posterior. Pode ainda ter em simultâneo um sistema de

backup que satisfaça as necessidades de consumo quando não existe recurso solar e/ou eólico disponível ou é insuficiente. O referido sistema de *backup* pode ser a rede elétrica pública de distribuição e/ou gerador auxiliar, Figura 16.

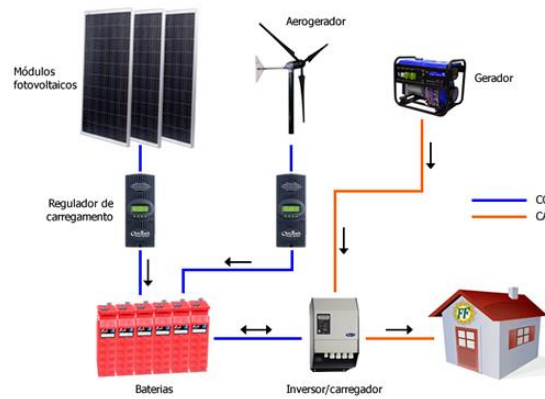


Figura 16. Sistema Híbrido

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Um dos objetivos deste projeto é, averiguar os possíveis mercados onde seja relevante a problemática do consumo de água e avaliar a possibilidade de satisfazer em parte as suas necessidades atuais, recorrendo à produção de água potável através da dessalinização com recurso a energia solar fotovoltaica.

Serão utilizados dados cartográficos sobre a escassez de água e *stress* hídrico, os níveis de irradiação e os recursos de águas salinas. Os resultados encontrados na elaboração deste trabalho podem contribuir para a gestão nacional e internacional do aproveitamento da água no nosso planeta, identificando e quantificando mercados emergentes para as centrais de dessalinização, um aspeto importante para a Martifer Solar, SA.

Importa ainda definir dois conceitos fortemente relacionados com a temática do projeto. São eles **escassez de água** e ***stress* hídrico**.

Segundo a FAO, a **escassez de água** ocorre quando a procura por este recurso excede a oferta num determinado domínio (agricultura, cidades, ambiente, etc). É, também, vista como o ponto em que o impacto global de utilização colide com o fornecimento ou a qualidade da água, na medida em que a procura não é satisfeita plenamente.

Pode ser dividida em duas categorias: física, quando não existe água suficiente para as necessidades humanas e económicas, quando o capital humano, institucional e financeiro restringe o acesso de água (mesmo que a água que se encontra na natureza esteja disponível para as necessidades humanas) [21].

O ***stress* hídrico** ocorre quando a procura de água excede a quantidade de água disponível num determinado período. É um conceito mais inclusivo e mais amplo do que escassez e está relacionado com vários fatores: recursos hídricos, qualidade de água, fluxos ambientais e acesso à água [3].

A Tabela 5 apresenta as categorias de escassez de água e stress hídrico.

Tabela 5. Escassez de água e *stress* hídrico. Adaptado de [3]

Escassez de água		Stress hídrico (local)	
Recursos hídricos nacionais (N , $\text{m}^3\text{capita}^{-1}\text{ano}^{-1}$)	Categorias	Rácio stress hídrico (F)	Categorias
$N \geq 2500$	Recursos suficientes	$F \leq 0,30$	Desprezível
$1700 \leq N < 2500$	Vulnerável	$0,30 < F \leq 0,50$	Baixo
$1000 \leq N < 1700$	Restrita	$0,50 < F \leq 0,70$	Ligeiramente explorados
$500 \leq N < 1000$	Escassez	$0,70 < F \leq 1$	Moderadamente explorados
$N < 500$	Escassez elevada	$F > 1$	Sobreexplorado

Método de Identificação de locais apropriados

Os locais que precisam de centrais de dessalinização solares são aqueles que possuem escassez ou fontes insustentáveis de água potável e que estão evidenciados por escassez ao nível nacional ou têm problemas locais de extração. Contudo a tecnologia apenas é possível de ser aplicada em locais onde existe um bom acesso às fontes de águas salinas e a eficiência/rentabilidade das centrais é altamente influenciada pela magnitude energia solar disponível.

Para a identificação dos locais apropriados utilizou-se um sistema de ranking que descreve a aplicabilidade global das tecnologias de dessalinização solar [3]. Este sistema foi descrito por Pugsley et al., e foi criado através do sumário e correlação de 4 conjuntos de dados cartográficos por nação numa base nacional.

Este sistema de ranking global (R) é definido pela seguinte equação (1):

$$R = \left(\frac{r_N + r_F}{2} \right) r_S r_H \quad (1)$$

Onde:

- r_N – escassez nacional de água [$\text{m}^3 \text{capita}^{-1} \text{ano}^{-1}$] (2);

$$r_N = \frac{7500}{N + 7500} \quad (2)$$

- r_F – stress hídrico (3);

$$r_F = \frac{F+0,03}{1,33} \quad (3)$$

- r_s - fontes água salina (ver Tabela 6);
- r_H - incidência solar anual [$\text{kWh m}^{-2} \text{ano}^{-1}$] (4).

$$r_H = \frac{H}{2700} \quad (4)$$

E R é calculado com base neste 4 parâmetros (r_N , r_F , r_s e r_H) e de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros do sistema de ranking. Adaptado de [3]

Parâmetros base	r_N	r_F	r_s^1	r_H
$r = 0$	$N = \infty$	$F = 0$	$r_s = 0$	0
$r = 0,25$	$N = 22500$	$F = 0,3$	Se S1, S2 e S3 forem válidos, mas não S4 e S5, então $r_s = 0,25^2$	$H = 670$ (valor mínimo global)
$r = 0,5$	$N = 7500$	$F = 0,6$ Ligeiramente explorados	Se S4 é válido mas não S5 então $r_s = 0,5$	(depende do país)
$r = 0,75$	$N = 2500$	$F = 0,9$ Moderadamente explorados	Se S5 é válido mas não S2 e S4 então $r_s = 0,75$	(depende do país)
$r = 1$	$N = 0$	$F = 1,3$ sobreexplorados	Se S5, S2 e S4 são válidos então $r_s = 1^3$	$H = 2700$ (valor máximo global)

Parâmetros base:

- $r = 1$ – corresponde às condições que indicam que a dessalinização solar como “altamente aplicável”. Aplica-se aos locais com escassez absoluta de água potável a nível nacional; têm um ou mais fontes de água salina fortemente exploradas; têm acesso à água do mar e águas subterrâneas altamente salinas e têm os níveis mais elevados de irradiação solar.

¹ S1 – aquíferos; S2 – lagos salinos; S3 – aquíferos onde a salinidade é causada pela irrigação agrícola; S4 – aquíferos onde a salinidade é causada pela dissolução, evaporação ou por processos hidrotermais; S5 – água do mar e salobra;

² Extração de aquíferos *connate*, lagos salinos ou aquíferos com salinidade causada pela poluição ou irrigação agrícola, são suscetíveis de ser insustentável. Os fatores ranking devem refletir o facto de que esses recursos são, em geral inadequados fontes de alimentação de água para as centrais de dessalinização.

³ Os lagos salinos e os aquíferos naturais podem ser utilizados para a descarga da água salmoura das centrais de dessalinização, como método de redução dos impactos ambientais negativos.

- $r \approx 0,75$ – representam as condições que são claramente propícias à dessalinização solar, isto é, quando a localização é considerável vulnerável à escassez nacional de água e os recursos hídricos estão moderadamente explorados, têm acesso à água do mar e têm bons níveis de insolação;
- $r \approx 0,5$ – reproduz as condições que são claramente propícias à dessalinização solar, isto é, quando a localização é consideravelmente vulnerável à escassez nacional de água e os recursos hídricos estão moderadamente explorados, têm acesso à água do mar e têm bons níveis de irradiação.
- $r \approx 0,25$ – traduz as condições marginais. Utiliza-se em locais onde não existe escassez de água a nível nacional e os recursos hídricos estão “ligeiramente explorados, em locais com acesso à água salgada subterrânea mas não à água salgada do mar e a irradiação é moderada.
- $r = 0$ – aplica-se em locais onde a dessalinização é considerada completamente desnecessária devido à abundância de água potável, em locais com impossibilidade de acesso a água salina e irradiação solar.

Através dos parâmetros base categorizam-se as áreas apropriadas para a dessalinização solar da seguinte forma:

- $R \leq 0,125$ – não aplicável
- $0,125 < R \leq 0,273$ – aplicabilidade limitada
- $0,273 < R \leq 0,422$ – aplicabilidade moderada
- $R > 0,422$ – elevada aplicabilidade

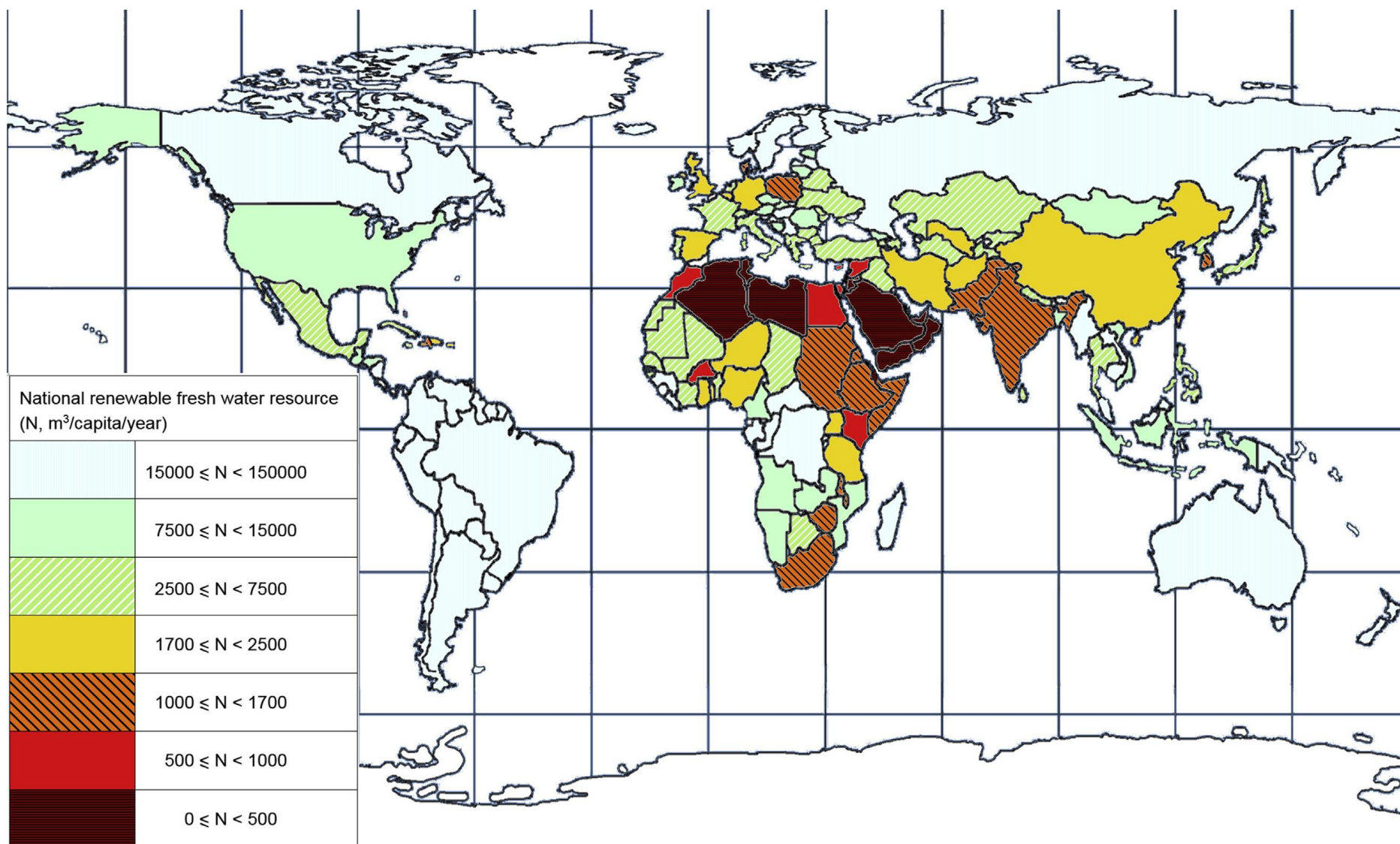


Figura 17. Recursos hídricos nacionais *per capita* [3]

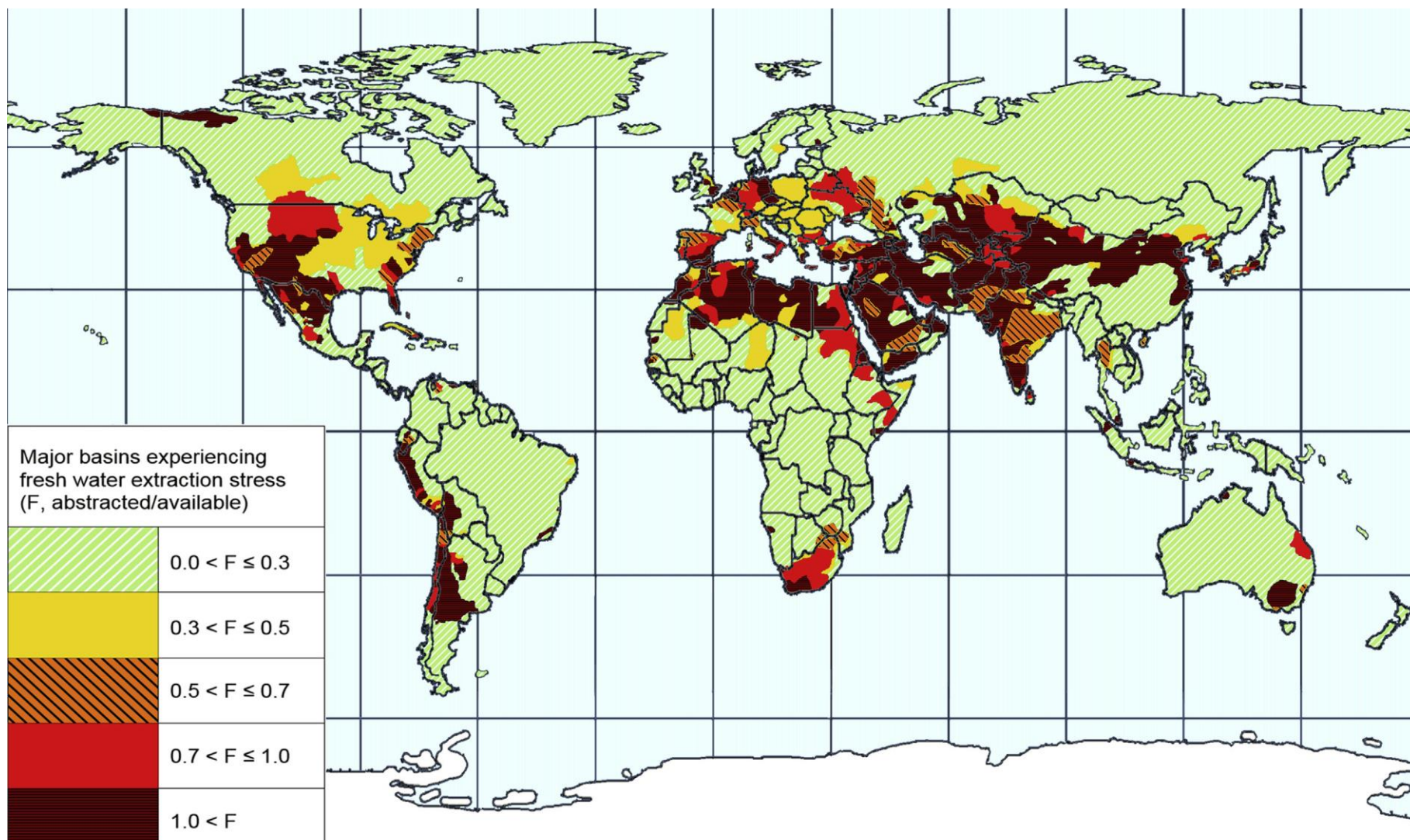


Figura 18. Stress hídrico. [3]

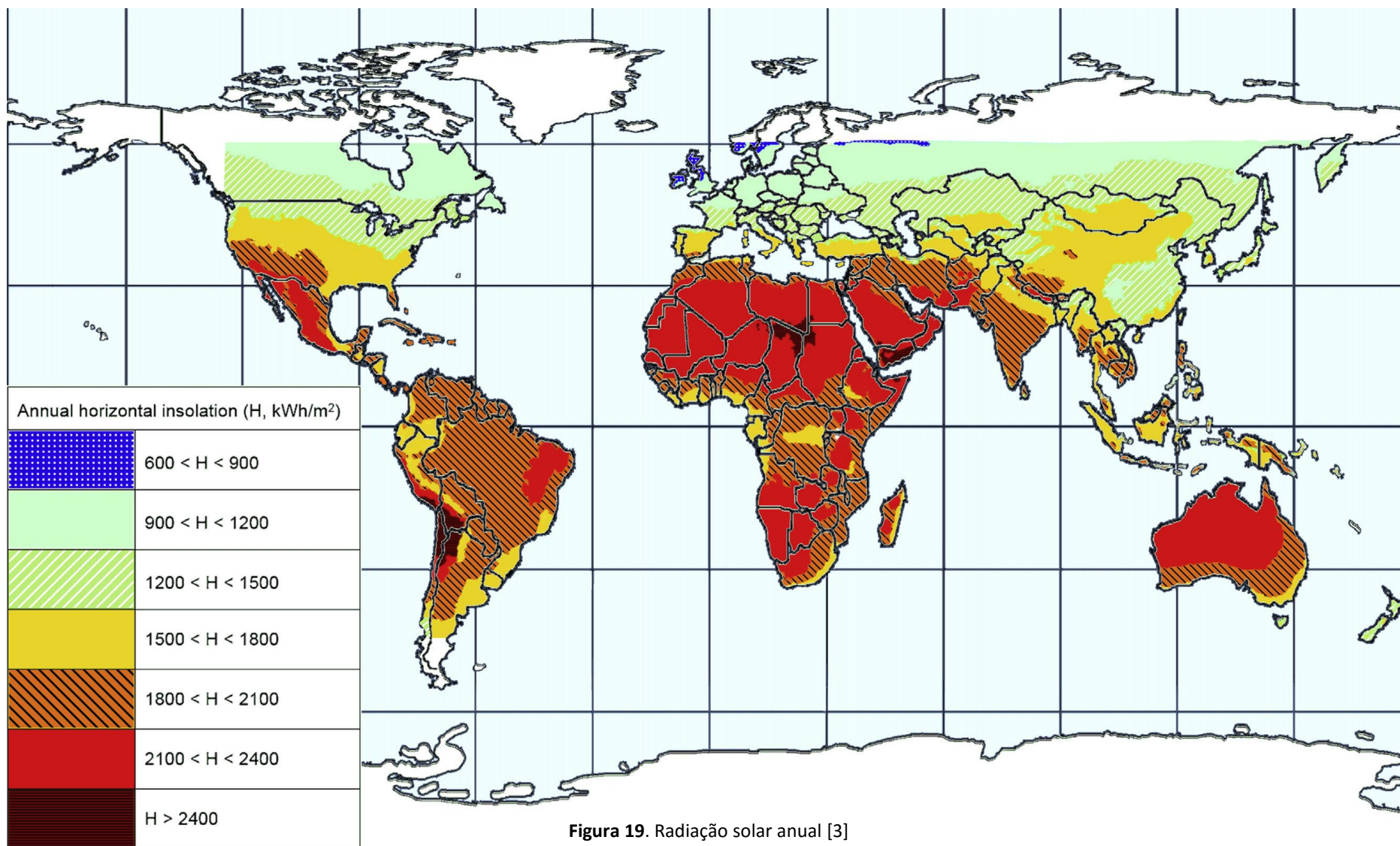


Figura 19. Radiação solar anual [3]

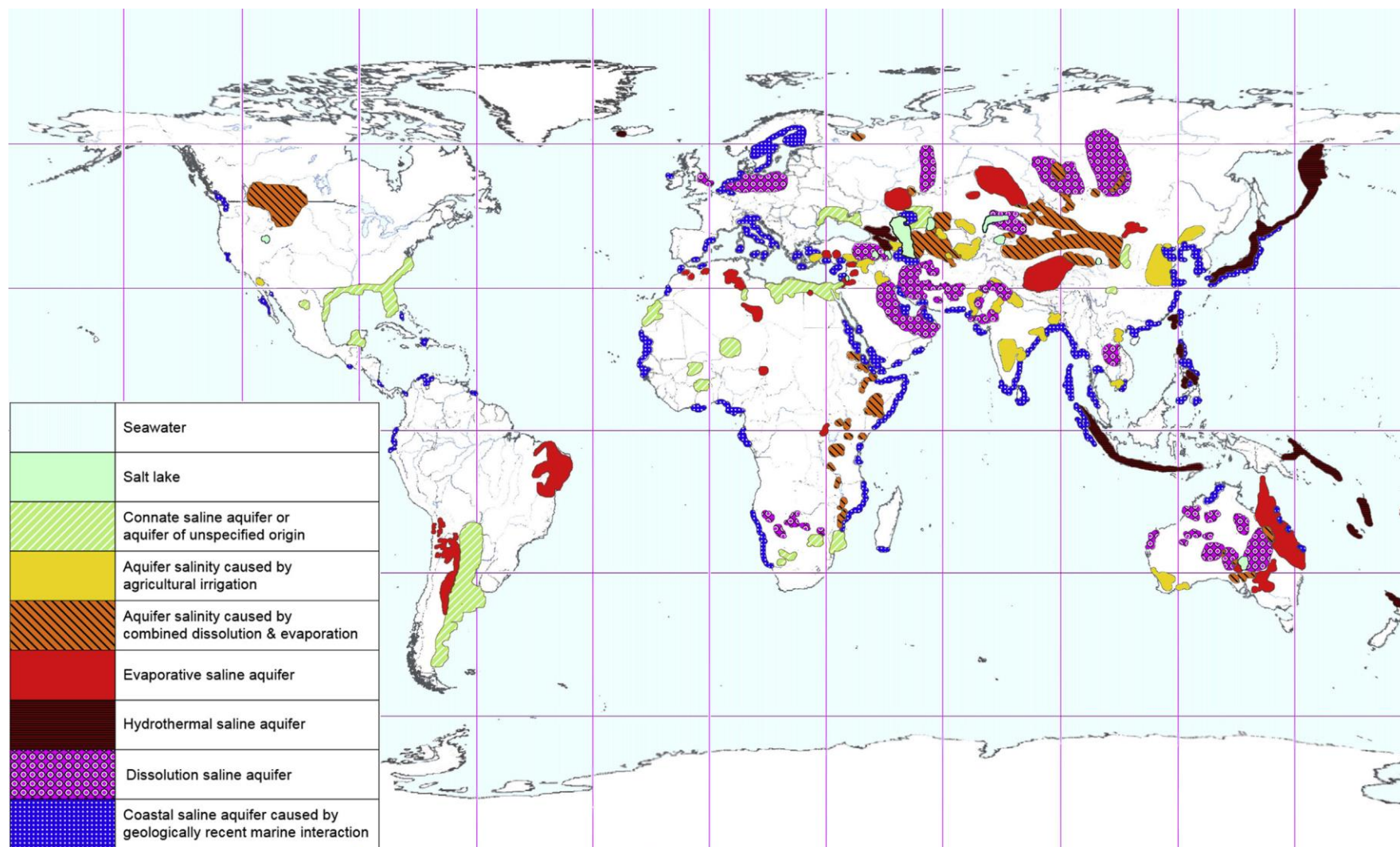


Figura 20. Recursos de água salina [3]

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Com este projeto pretende-se avaliar os potenciais mercados com interesse para a empresa Martifer Solar. Tendo por base o sistema de ranking descrito anteriormente e a base de dados do Banco Mundial e do FAO AQUASTAT.

Os valores da Tabela 7 foram obtidos através das figuras 17, 18, 19 e 20.

Tabela 7. Dados dos vários países em estudo

Países	População (2015)	Recursos hídricos nacionais (N , $\text{m}^3\text{capita}^{-1}\text{ano}^{-1}$)	Stress hídrico (F)	Recursos de água salina	Irradiação solar (H , $\text{kWh m}^{-2}\text{ano}^{-1}$)
África do Sul	54 767 000	1350	1,15	0,75	1950
Angola	25 022 000	11250	0,15	0,75	2100
Argélia	39 667 000	250	1,15	1	2250
Bélgica	11 301 000	2100	1,15	0,75	1050
Chile	17 948 000	82500	1,15	1	1650
Egito	91 508 000	750	1,15	1	2250
Emiratos Árabes Unidos	9 157 000	1350	1,15	1	2250
Eslováquia	5 423 000	11250	0,4	0	1050
Guiné-Bissau	1 844 000	82500	0,9	0,75	2100
Itália	60 772 000	5000	1,15	0,75	1500
Japão	26 820 000	5000	1,15	1	1350
Líbia	6 278 984	250	1,15	1	2250
Marrocos	34 378 000	750	1,15	1	2100
México	127 017 000	5000	1,15	0,75	2100
Moçambique	27 978 000	11250	0,6	1	1950
Nigéria	182 202 000	2100	0,15	1	1950
Nova Zelândia	4 548 000	82500	0,15	1	1350
Peru	31 383 148	82500	1,15	0,75	1950
Portugal	10 401 062	500	0,15	0,75	1650
Reino Unido	64 955 000	2100	1,15	1	900
República Checa	10 534 000	11250	1,15	0	1050
Roménia	19 765 000	11250	0,4	0,75	1350
Senegal	15 129 000	5000	1,15	0,75	2250
Ucrânia	45 157 000	5000	0,9	0,75	1200

Os parâmetros foram calculados da seguinte forma:

- **Recursos hídricos internos** (através da tabela 16) - Identifica-se em que valores se encontra o país e calcula-se o valor médio. Por exemplo: Moçambique – 7500 $\leq N < 1500$, valor médio: 11250 m³/capita/ano
- **Stress Hídricos** (através da tabela 17 e da tabela 6) - Este valor depende do quanto explorado está o país em recursos hídricos,
- **Água salina** (através da tabela 6 e da figura 20) - Depende dos recursos que os países possuem no que diz respeito a água salina (se faz fronteira com mar, se tem aquíferos ou lagos salgados)
- **Irradiação solar** (através da figura 18) - Valor médio entre os valores correspondentes do país.

4.1. RESULTADOS

Após a recolha dos dados calculam-se os fatores utilizando as equações (1), (2), (3) e (4) anteriormente descritas. Com a tabela 8 de resultados pode-se definir em que países é possível implementar uma central dessalinização solar.

Tabela 8. Resultados obtidos

Países	r_N	r_F	r_S	r_H	R
Eslováquia	0,400	0,323	0	0,389	0,000
República Checa	0,400	0,887	0	0,389	0,000
Nova Zelândia	0,083	0,135	1	0,500	0,055
Guiné-Bissau	0,083	0,135	0,75	0,778	0,064
Roménia	0,400	0,323	0,75	0,500	0,136
Angola	0,400	0,135	0,75	0,778	0,156
Ucrânia	0,600	0,699	0,75	0,444	0,217
Bélgica	0,781	0,887	0,75	0,389	0,243
Peru	0,083	0,887	0,75	0,722	0,263
Reino Unido	0,781	0,887	1	0,333	0,278
Chile	0,083	0,887	1	0,611	0,297
Portugal	0,600	0,699	0,75	0,611	0,298
Itália	0,600	0,887	0,75	0,556	0,310
Moçambique	0,400	0,474	1	0,722	0,315
Nigéria	0,781	0,135	1	0,722	0,331
Japão	0,600	0,887	1	0,500	0,372
México	0,600	0,887	0,75	0,778	0,434
Senegal	0,600	0,887	0,75	0,833	0,465
África do Sul	0,847	0,887	0,75	0,722	0,470
Marrocos	0,909	0,887	1	0,778	0,699
Emiratos Árabes Unidos	0,847	0,887	1	0,833	0,723
Egito	0,909	0,887	1	0,833	0,748
Argélia	0,968	0,887	1	0,833	0,773
Líbia	0,968	0,887	1	0,833	0,773

4.2. DISCUSSÃO

4.2.1. PAÍSES ONDE A DESSALINIZAÇÃO SOLAR NÃO APLICÁVEL

A tabela 9 apresenta os países em que a dessalinização solar não é aplicável.

Considera-se a dessalinização solar não aplicável em regiões em que o acesso às águas salinas não é possível ou é irrelevante ($r_S = 0$). É o caso da República Checa que apresenta um r_S nulo.

A dessalinização solar é considerada não aplicável ainda em áreas onde a escassez de água e o stress hídrico é mínima ($r_N + r_F < 1$). É o caso da Eslováquia – $0,400 + 0,323 < 1$, da Guiné Bissau e da Nova Zelândia – $0,083 + 0,135 < 1$.

Também é considerada dessalinização solar não aplicável em zonas onde o recurso solar é pouco abundante ($r_H < 0,50$). É o caso da Eslováquia e República Checa - $r_H = 0,389$.

Nestes 4 países, Eslováquia, República Checa, Guiné Bissau e Nova Zelândia não se aconselha a implementação de centrais de dessalinização solar fotovoltaica.

Tabela 9. Dessalinização não aplicável ($R < 0,125$)

Países	r_N	r_F	r_S	r_H	R
Eslováquia	0,400	0,323	0	0,389	0,000
República Checa	0,400	0,887	0	0,389	0,000
Nova Zelândia	0,083	0,135	1	0,500	0,055
Guiné-Bissau	0,083	0,135	0,75	0,778	0,064

4.2.2. PAÍSES ONDE A DESSALINIZAÇÃO SOLAR É LIMITADA

A tabela 10 indica os países em que a dessalinização solar é limitada pela disponibilidade da água potável a nível nacional ($r_N < 0,5$) indicando que o acesso a água potável não necessita de recorrer à dessalinização. É o caso de Angola, Perú e Roménia respetivamente com $r_N = 0,400$, $r_N = 0,083$ e $r_N = 0,400$ que apresentam elevada disponibilidade da água potável a nível nacional ($r_N < 0,5$).

As áreas onde a dessalinização solar é limitada por apresentarem o parâmetro recurso solar relativamente baixo ($r_H < 0,5$), são a Bélgica e Ucrânia com $r_H = 0,389$ e $r_H = 0,444$ respetivamente.

Nestes países a construção de centrais de dessalinização solar é pouco aconselhada.

Tabela 10. Dessalinização solar limitada ($0,125 < R < 0,273$)

Países	r_N	r_F	r_S	r_H	R
Roménia	0,400	0,323	0,75	0,500	0,136
Angola	0,400	0,135	0,75	0,778	0,156
Ucrânia	0,600	0,699	0,75	0,444	0,217
Bélgica	0,781	0,887	0,75	0,389	0,243
Peru	0,083	0,887	0,75	0,722	0,263

4.2.3. PAÍSES ONDE A DESSALINIZAÇÃO SOLAR É MODERADA

A tabela 11 apresenta os países em que a dessalinização solar é moderada.

A dessalinização solar é moderada nas regiões onde a incidência solar é baixa ($r_H < 0,5$) mas que ao mesmo tempo apresentam grandes recursos de águas salinas, principalmente água do mar ($r_S > 0,5$). É o caso do Japão – $r_H = 0,500$ e $r_S = 1$ e do Reino Unido – $r_H = 0,333$ e $r_S = 1$.

O Chile e Moçambique apresentam abundância de recursos hídricos a nível nacional ($r_N < 0,5$) indicando que a procura por água potável não necessita de recurso à dessalinização. No entanto apresentam elevada irradiação solar fazendo destas países zonas de dessalinização solar moderada.

Por apresentarem elevados recursos de água salgada ($r_S > 0,5$) e irradiação solar ($r_H < 0,5$) bem como alguma escassez de água e stress hídrico ($r_N + r_F > 1$), Itália, Nigéria e Portugal são consideradas zonas de dessalinização solar moderada.

Tabela 11. Dessalinização solar moderada ($0,273 < R < 0,422$)

Países	r_N	r_F	r_S	r_H	R
Reino Unido	0,781	0,887	1	0,333	0,278
Chile	0,083	0,887	1	0,611	0,297
Portugal	0,600	0,699	0,75	0,611	0,298
Itália	0,600	0,887	0,75	0,556	0,310
Moçambique	0,400	0,474	1	0,722	0,315
Nigéria	0,781	0,135	1	0,722	0,331
Japão	0,600	0,887	1	0,500	0,372

4.2.4. PAÍSES ONDE A DESSALINIZAÇÃO SOLAR É FORTEMENTE APLICADA

A tabela 12 apresenta os países em que a dessalinização solar é fortemente aplicada.

Todos eles sofrem de escassez de água e stress hídrico ($r_N + r_F > 1$), têm irradiação e acesso a recursos de águas salinas, principalmente água do mar, elevados ($r_S > 0,5$) e ($r_H > 0,5$) apresentando uma pontuação na classificação geral $R > 0,422$.

Deste grupo destacam-se a Argélia e a Líbia, ambos com um $R = 0,773$, o valor mais elevado da tabela.

É nestes países que a implementação de um sistema de dessalinização solar é “ideal” e fortemente recomendada.

Tabela 12. Dessalinização solar fortemente aplicável ($R > 0,422$)

Países	r_N	r_F	r_S	r_H	R
México	0,600	0,887	0,75	0,778	0,434
Senegal	0,600	0,887	0,75	0,833	0,465
África do Sul	0,847	0,887	0,75	0,722	0,470
Marrocos	0,909	0,887	1	0,778	0,699
Emiratos Árabes Unidos	0,847	0,887	1	0,833	0,723
Egito	0,909	0,887	1	0,833	0,748
Argélia	0,968	0,887	1	0,833	0,773
Líbia	0,968	0,887	1	0,833	0,773

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

É necessário encarar o problema da escassez de água, como um tema cada vez mais abrangente a nível global, promovendo e desenvolvendo novos recursos e novas formas de abastecimento de água. A dessalinização deve ser considerada como um meio viável para dar resposta a este problema.

As duas técnicas que contabilizam a maior parcela da capacidade global de dessalinização de água salgada são a RO e a MSF. A combinação de dessalinização por RO alimentada por sistemas solares fotovoltaicos tem sido bastante desenvolvida para pequenos sistemas isolados. Atualmente, já existem vários sistemas de pequena capacidade instalados em locais isolados como na Tunísia e em Marrocos, representando 0,02% da capacidade total de dessalinização a nível mundial.

A osmose inversa com painéis fotovoltaicos é uma solução adequada às pequenas comunidades quer para consumo quer para a agricultura, com a vantagem de poder ser projetado e estruturado facilmente, utilizando componentes modulares. Outras vantagens desta tecnologia incluem a fácil manutenção e o facto de o impacto ambiental ser mínimo. No entanto o custo de água é elevado em comparação com os processos que utilizem combustíveis fósseis. Os custos tendem a baixar quando se trata de centrais a uma escala maior e localizados em sítios onde a radiação solar é elevada.

Este projeto teve como objetivo identificar os locais mais apropriados para a instalação de uma central de dessalinização solar num modo global, utilizando parâmetros como os recursos hídricos nacionais, o *stress* hídrico, a radiação solar e a disponibilidade das águas salinas (locais).

Foram selecionados 24 países e através do método de *ranking* utilizado foi possível perceber quais os países mais “qualificados” e os menos “qualificados” para a implementação desta tecnologia.

Com os resultados obtidos, verificou-se que os países com os parâmetros mais baixos, ou seja, com recurso a águas salinas pouco relevantes ou mesmo sem acesso, com baixa radiação solar e com recursos suficientes de água potável (países que não sofrem de escassez de água) são Nova Zelândia, Eslováquia, Guiné-Bissau e República Checa, não sendo por isso rentável a implementação de sistemas de dessalinização solar.

Africa do Sul, Argélia, Egito, Emirados Árabes Unidos, Líbia, Marrocos, México e Senegal são os países “ideais” para a possibilidade de serem instaladas centrais de dessalinização solar.

Estão implantados em locais com elevada escassez de água, com enormes recursos de águas salinas (principalmente acesso ao mar) e com grandes níveis de radiação solar. É nestes países que este sistema é fortemente recomendado.

Os restantes 12 países que se analisaram encontram-se no grupo de países onde a implementação desta tecnologia é considerada moderada ou limitada.

Perspetivas Futuras

Este projeto não envolveu componente prática, apenas foi feita uma compilação de vários estudos disponíveis publicamente sobre a dessalinização e energia solar fotovoltaica com vista a perceber quais os países onde se poderia aplicar esta tecnologia.

Os locais mais apropriados para a dessalinização estão identificados. Futuramente poder-se-ia fazer um estudo de viabilidade económica recolhendo dados como preço da água, da energia, o consumo de água, quais as necessidades em água potável do país, para consumo, para irrigação, para o sector industrial, para uso doméstico, estudo de impacto ambiental, entre outros.

Seria importante também saber se a dessalinização se deve apenas implementar em pequenas comunidades ou para grandes escalas, quais os equipamentos necessários, se se opta por um sistema autónomo ou com ligação à rede.

Fazer um estudo de viabilidade económica, perceber o custo benefício da implementação de um sistema que utiliza energia limpa, renovável na transformação de água salina em água potável em zonas carenciadas deste bem cada vez mais escasso e por isso cada vez mais precioso, é o caminho a percorrer no futuro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FAO WATER, "Water Scarcity," 2013. [Online]. Available: http://www.fao.org/nr/water/topics_scarcity.html. [Accessed: 25-Aug-2014].
- [2] M. Â. Pinho, "MEIO DE CULTIVO A BASE DE CONCENTRADO DE DESSALINIZAÇÃO OBTIDO POR OSMOSE INVERSA PARA *Arthrospira (Spirulina) platensis*," Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- [3] A. Pugsley, A. Zacharopoulos, J. D. Mondol, and M. Smyth, "Global applicability of solar desalination," *Renew. Energy*, vol. 88, pp. 200–219, Apr. 2016.
- [4] A. C. Araújo, "Contribuição para o estudo da viabilidade/sustentabilidade da dessalinização enquanto técnica de tratamento de água," Universidade Nova de Lisboa, 2013.
- [5] K. Zotalis, E. Dialynas, N. Mamassis, and A. Angelakis, "Desalination Technologies: Hellenic Experience," *Water*, vol. 6, no. 5, pp. 1134–1150, Apr. 2014.
- [6] L. M. T. Pagaime, "Dimensionar uma instalação de dessalinização de água por destilação a baixa temperatura," Universidade Técnica de Lisboa.
- [7] E. Mathioulakis, V. Belessiotis, and E. Delyannis, "Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art," *Desalination*, vol. 203, no. 1–3, pp. 346–365, Feb. 2007.
- [8] IDA (International Desalination Association), "Desalination by the Numbers." [Online]. Available: <http://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/>. [Accessed: 03-May-2016].
- [9] NationalResearchCounciloftheNationalAcademies, *Desalination: A National Perspective*. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS: Washington, D.C., 2008.
- [10] "Sistema de dessalinização." [Online]. Available: https://www.nrdc.org/onearth/04sum/images/saline_diagram.jpg. [Accessed: 20-Nov-2014].
- [11] M. Shatat, M. Worall, and S. Riffat, "Opportunities for solar water desalination worldwide: Review," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 9, pp. 67–80, Dec. 2013.
- [12] A. Al-Karaghoul, D. Renne, and L. L. Kazmerski, "Solar and wind opportunities for water

- desalination in the Arab regions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9. pp. 2397–2407, 2009.
- [13] M. L. F. B. Guerreiro, “Dessalinização para produção de água potável: perspectivas para Portugal,” Universidade do Porto, 2009.
- [14] “Destilação solar.” [Online]. Available: <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/water-sources/hardware/surface-water-sources/desalination>. [Accessed: 07-Nov-2015].
- [15] I. C. Karagiannis and P. G. Soldatos, “Water desalination cost literature: review and assessment,” *Desalination*, vol. 223, no. 1–3, pp. 448–456, Mar. 2008.
- [16] S. Jucá and P. Carvalho, *Métodos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos: Aplicações em dessalinização*, Duque de C. 2013.
- [17] “electrodialysis.” [Online]. Available: <http://www.periodni.com/gallery/electrodialysis.png>. [Accessed: 07-Nov-2015].
- [18] “Osmose Inversa.” [Online]. Available: [http://cf.ydcn.net/1.0.1.26/images/main/reverse osmosis.jpg](http://cf.ydcn.net/1.0.1.26/images/main/reverse%20osmosis.jpg). [Accessed: 09-Nov-2015].
- [19] M. A. A. P. Diogo, “Dessalinização da Água do Mar,” UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR.
- [20] N. Ghaffour, T. M. Missimer, and G. L. Amy, “Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability,” *Desalination*, vol. 309, pp. 197–207, Jan. 2013.
- [21] D. P. Clarke, Y. M. Al-Abdeli, and G. Kothapalli, “The effects of including intricacies in the modelling of a small-scale solar-PV reverse osmosis desalination system,” *Desalination*, vol. 311, pp. 127–136, Feb. 2013.

